

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20500052

研究課題名（和文） 柔軟型クラスタ環境に向けたリコンフ・プログラミング教育システム

研究課題名（英文） Reconfigurable programming learning system for Heterogeneous PC Cluster Environment

研究代表者

大西 淑雅（OHNISHI YOSHIMASA）

九州工業大学・情報科学センター・講師

研究者番号：50213806

研究成果の概要（和文）：リコンフィギャラブルコンピュータやヘテロジニアス PC クラスタ環境のための、並列プログラミング学習システムを開発した。教材は、コアテキストと並列プログラミング演習などから構成され、並列コンピュータやリコンフィギャラブルコンピュータのプログラミングを学べる。さらに、FPGA 開発ボードを使用し、リコンフィギャラブル PC クラスタのためのリコンフィギャラブルネットワークスイッチを設計した。ネットワークスイッチの実装と簡単なパフォーマンス評価について報告した。

研究成果の概要（英文）：We report about one of the development methods of the parallel programming learning system for the reconfigurable/heterogeneous PC cluster environment by e-learning. It is that unified material consisting of the core text, parallel programming exercises, with which a student study the whole programming of parallel and reconfigurable computers by himself. In addition, we design the reconfigurable network switch for reconfigurable PC cluster using FPGA board kits. We develop the reconfigurable network switch and report the basic performance of our network switch.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学計・算機システム・ネットワーク

キーワード：リコンフィギャラブルシステム、プログラミング教育

1. 研究開始当初の背景

高性能な計算機を構築する方法として、複数の計算機をクラスタリングするアーキテクチャが注目を集めている。例えば、近年の PC クラスタに関する研究は、複数のコアを搭載した CPU を使った構成や特定アプリケーションに特化した構成、などが主流となってきた。また、いわゆるハイパフォーマンスを目指すだけでなく、高い信頼性と既存システムとの相互接続性を重視する場合もある。このように、システムの目的や重視される点を考慮した、言い換えれば、可変性や柔軟性

に着目した計算機システムが求められており、多くの研究者がクラスタコンピューティング環境やリコンフィギャラブルシステムに関する開発を行っている。

一方、クラスタコンピューティング環境やリコンフィギャラブルシステムの高性能化と多様化は、これらのアーキテクチャ教育を非常に難しくしている。なぜなら、使用する計算機システムのアーキテクチャを十分に理解しなければ、その計算機が持つ能力を最大限に活かすことができないためである。例えば、CELL プロセッサを搭載した Play

Station 3 は低価格で高性能な計算機システムであるが、品質の良いアプリケーションプログラムは、開発者の知識とノウハウに影響され、だれでも手軽に開発できる状況ではない。CELL プロセッサの特徴や構成を十分に理解した開発者のみで、アプリケーション開発が行われているのが現状である。

もちろん、コンパイラ技術の進歩や開発モジュールの整備により、プログラミング環境の整備は進んできたといえる。しかし、多くの大学では、一般的な並列プログラミング教育しか行われておらず、可変性や柔軟性に着目したプログラミング教育は、一部の大学でしか行われていない。可変性や柔軟性に着目した計算機システムの真の普及には、クラスタコンピューティング環境やリコンフィギャラブルシステムに関するアーキテクチャ教育やプログラミング教育を、もっと広めていく必要がある。

2. 研究の目的

クラスタコンピューティング環境やリコンフィギャラブルシステムの高性能化と多様化は、アーキテクチャ教育にも影響を与えつつある。本研究では、柔構造型クラスタ環境に関する試作経験と基礎研究などの結果を踏まえて、「柔構造型クラスタ環境に向けたリコンフィギャラブル・プログラミング教育システム」の開発を行う。

具体的には、現在までの e-ラーニング教材の開発やシステム構築などの経験を活かし、「リコンフィギャラブル・プログラミング教育」のための e-ラーニング用教材を学習管理システム (Learning Management System) 上に開発する。また、CELL や GPU といった問題種類によって能力を発揮する特殊なノードを PC クラスタに組み込んだ環境を想定し、作成する教材とうまく融合させ、従来の学習管理システムでは難しいとされる並列プログラミング演習の実現を目指す。

教材の内容は、クラスタコンピューティング環境やリコンフィギャラブルシステムに関するアーキテクチャ教育の内容を含んだ教材開発も目指す。さらに、クラスタの構成や対象とするアプリケーションの特性、ネットワーク遅延やノードの構成やメモリの構成などに着目して、学習者がクラスタ構成をリコンフ (再構築) しつつ、実習を行うことができるようにする。

3. 研究の方法

柔構造型クラスタ環境に向けたリコンフィギャラブル・プログラミング教育システムの開発は次の項目に分けて研究を行った。全体に先立ち、リコンフィギャラブル・プログラミング教育システムの設計をまず行う。また、関連研究や論文を調査し、他のクラスタ

コンピュータやリコンフィギャラブルシステムに関する教育・研究動向も調査した。

(1) 教材・演習の開発

並列アーキテクチャを教育する 1 つの方法として、並列プログラミングを題材に教材演習を検討した。プロトタイプとしてリコンフィギャラブルあるいはヘテロジニアスな並列アーキテクチャを学ぶことを目指した。具体的には、既存の MPI プログラミング教育や CELL プログラミング教育などの現状を調査し、並列プログラミングの教材と演習について検討した。

教育の流れは、e-ラーニングコンテンツによる学習 (例題を提示と解説など) を行い、知識と理解を定着させるための演習を実施する、といったシンプルな構成 (図 1) とした。なお、演習内容は、「並列処理プログラムを作成するための知識の獲得を目指す基礎演習」、「並列プログラムを実践的に学ぶ演習」、「並列プログラミングが、アーキテクチャ (計算機の種類と構成) によって、計算性能に与える影響について検討する応用演習」に分類して検討した。



図 1: 教材・演習の設計例

(2) 演習環境

本研究では、クラスタコンピューティング環境の特徴に適した並列プログラミングを実践的に演習できる環境を用意する。また、

リコンフィギャラブルシステムに対応した演習環境の設計とプロトタイプ実装を目指した。図2はPCクラスタ環境において、ノードの処理能力が異なる場合やネットワーク速度が異なる場合などを、学習者が自由に設定した上で演習を実施できる演習環境を目指したものである。

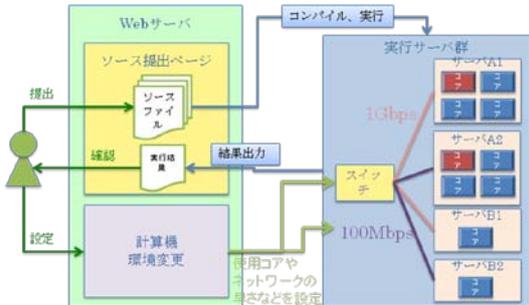


図2：演習環境の設計

プロトタイプ実装では、WebサーバとしてMoodleを選択した。Moodleに演習課題の解答プログラムを提出すると、実行サーバ群(PCクラスタ)でコンパイルおよび実行が行われ、実行結果をMoodle上で確認できるようにした。なお、学習者は実行サーバ群に演習の条件(プロセッサ数、ネットワーク速度、など)を設定できるようにした。

(3) 柔軟なクラスタ環境

リコンフィギャラブルシステムに対応した演習環境を実現するためには、リコンフィギャラブルなネットワークスイッチが不可欠である。そこで、近年高性能化が著しい、通信ハードウェアマクロを実装したFPGAデバイスに着目した。具体的にはXilinx製Virtex-5を搭載した開発ボードキットを複数導入し、ネットワークスイッチの設計とプロトタイプ実装(図3)を目指した。

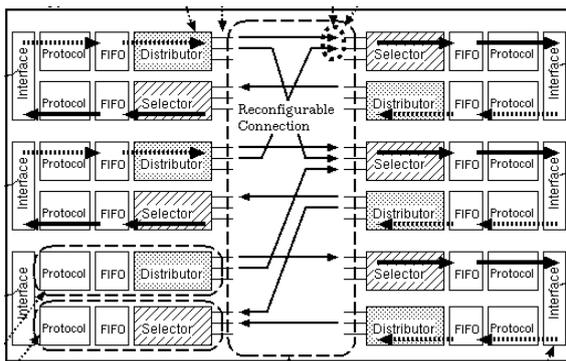


図3：ネットワークスイッチの設計

4. 研究成果

(1) 教材・演習の開発

Moodle上に教材を14トピックにわけて実装した。図4にコースの一部のメニューを示す。1単元(1コマ)として演習資料、演習課題、小テスト、確認テストを実装した。1単元の学習時間は90分を想定した。



図4：教材の一部(最初の2単元)

演習資料、小テストはMoodleのWebページ(資料)作成機能や小テスト作成機能を用いて作成した。具体的には、Cloze、穴埋めや記述式、選択式といった形式の問題を用意した。図5は知識の定着を狙った穴埋め問題(演習)の例である。



図5：小テストを使った理解度テストの例

計算の並列化方法を変更する

次のような並列分散処理を行うプログラムを作成してください。

- rank0: 4N番目(Nは自然数)の面積を計算
- rank1: 4N+1番目の面積を計算
- rank2: 4N+2番目の面積を計算
- rank3: 4N+3番目の面積を計算

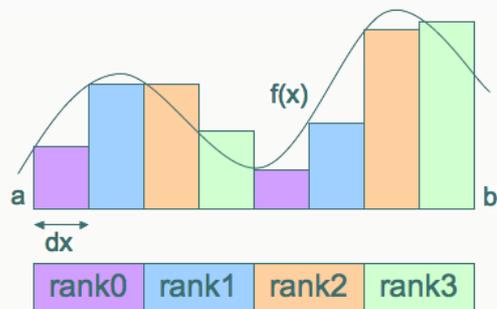


図6：演習問題の例

(2) 演習環境

並列アーキテクチャ教育のための演習では、個々の学習者に対して、並列計算機資源を演習の条件として与える。例えば、図6に示すような単純な並列プログラミング演習に対して、ノード毎の処理能力の違いやネットワークトポロジ（あるいはネットワーク速度）の違い、メモリ資源の分布状況を変化させることができれば、並列アーキテクチャに対応した並列プログラミング手法を習得できると考えられる。

そこで、「並列処理プログラムの実行機能（計算機資源の確保）」と「ネットワーク速度設定機能」を持つ演習環境を実装した。演習課題は Moodle の課題提出機能を用いてプログラムファイルの提出を行えるようにし、同時に設定ファイルも提出することで、計算機資源の設定、ネットワーク速度の設定も行う。

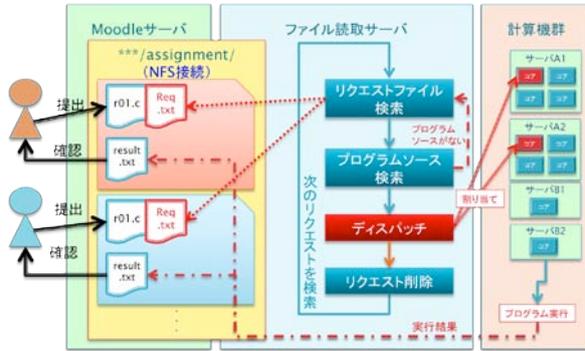


図7: 実行機能の実装例

図7に示す実装例では、学習者が設定できるパラメータとして、コア数、サーバ種類および数、コンパイル、実行における入出力ファイルの指定などを実現した。Moodle の課題提出機能でアップロードされたファイルはコース内の assignment ディレクトリ (/コース番号/moddata/assignment) に保存される。このディレクトリを NFS で各計算サーバに接続した。各種パラメータ (req.txt) は、図7に示すように、ソースファイル (r01.c) と同時にサーバに渡され、計算機資源の割り当てを行った上で、コンパイル&実行を行う。なお、コンパイルや実行の結果は、Moodle を介してユーザに返還 (result.txt) される。

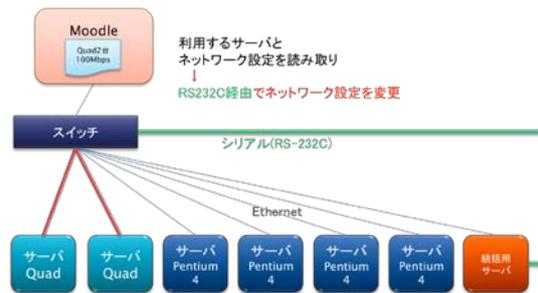


図8: ネットワーク設定

各種パラメータ (req.txt) には、実行するプログラムファイル名、プログラム実行に用いるコア数とサーバ数 (Quad サーバや i7 サーバといった種類ごとに指定できる)、入力ファイル名以外に、サーバを結ぶネットワーク速度の指定することができる。使用する計算機的能力 (種類) とネットワーク速度自由に組み合わせ設定することができないが、ネットワーク速度 (1Gbps や 100Mbps) を設定することができる。

図8に示すように、ネットワークスイッチの速度設定を Moodle 側から行うことでこの機能を実装している。なお、このネットワークスイッチ自身を、FPGA デバイスを用いて作成することで、将来的には様々なトポロジを短時間に設定することができる。

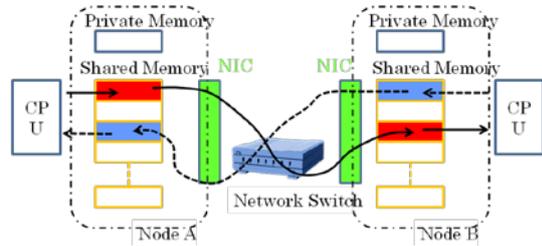


図9: 分散共有メモリにおけるリコンフィギャラブル PC クラスタの例

(3) 柔構造型クラスタ環境

図9に示すようなリコンフィギャラブル PC クラスタのアーキテクチャを学ぶためには、リコンフィギャラブル PC クラスタにおける、ネットワークスイッチが不可欠となる。また、RS-232C で既存のネットワークスイッチを制御する方法から、ネットワークスイッチそのものを FPGA で構成することで、リコンフィギャラブルなプログラミング学習やアーキテクチャ学習が可能となる。

そこで、図3に示すネットワークスイッチの設計を基に、分散共有メモリに基づく行列演算を演習の題材とすることができる、ネットワークスイッチのプロトタイプ実装 (図10) とその評価を行った。

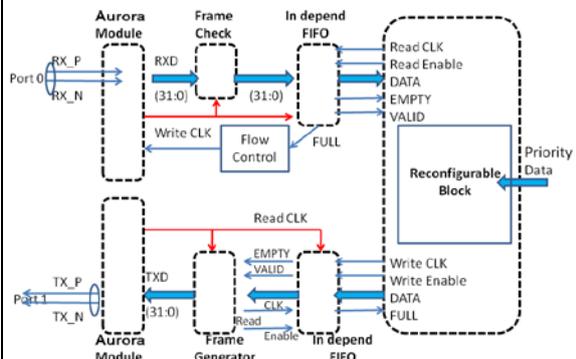


図10: ネットワークスイッチの実装例

プロトタイプ実装は、ベースとなる通信プロトコルはAuroraを使用し、FIFOなどの標準IPを用いて行った。実装結果から、FPGA資源の消費量を測定し、100ポート程度の大規模なネットワークスイッチの実現可能性について明らかにした。また、必要なルートのみをFPGAで構成するスタティックルート方式の利点について簡単な比較検討を行った。最後に、図11に示すように、プロトタイプ実装の結果とシミュレーションによるレイテンシの解析を行った。その結果、100ポート程度のFPGAベースのネットワークスイッチの実現可能性を示すことができた。

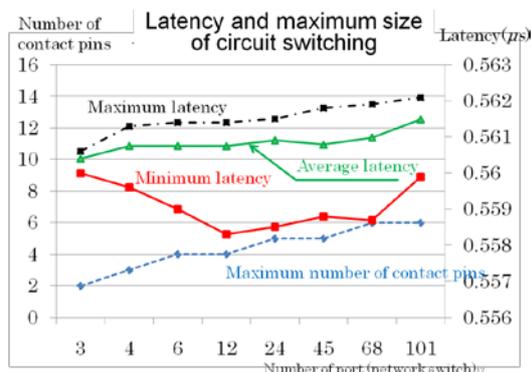


図 11 : パフォーマンス評価

(4) 評価

本研究の総合的な評価は実践的教育を実施することで取得することができるが、本報告では、基礎的な評価として「学習環境」と「演習環境」に関する結果を示す。なお、柔軟なクラスタ環境に関する評価は図11に示している。

①学習環境

演習による学習効果を確認するために学部生5名を用いた簡易な実践を行った。なお、実践者には並列プログラミングの学習経験はない。

演習教材の評価について述べる。「基礎演習」の内容については、図12に示す結果から、小テストや確認テストのスコアからほとんどの学習者が7割を超える結果を得ることができた。想定学習時間90分よりも短い時間で学習できたことから、「基礎演習」の学習環境としては十分な成果を得られた。

一方、「実践演習」「応用演習」には改善が必要であることが判明した。学習者の前提知識や潜在的なプログラミング能力の差によって、想定学習時間を超えることが多い結果となった。学習者が並列プログラミングを理解し、並列プログラムの作成技術を十分習得できるようになった(図13)とは言えない。

しかし、「実践演習」「応用演習」においては前提知識の不足が演習課題の成否に関わりやすいことも判明した。よって、その内容

を資料として教材追加することで理解度が上がる可能性は高い。実践的な評価ではこれらの改良を加えて再評価を行う予定である。

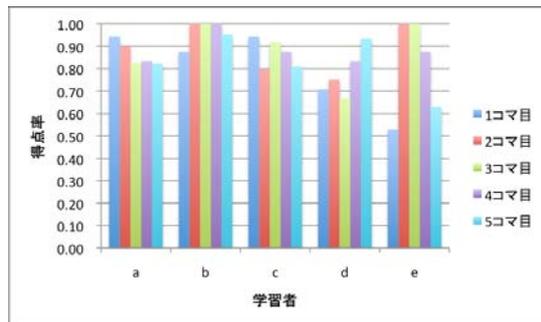


図 12: 基礎演習の理解状況

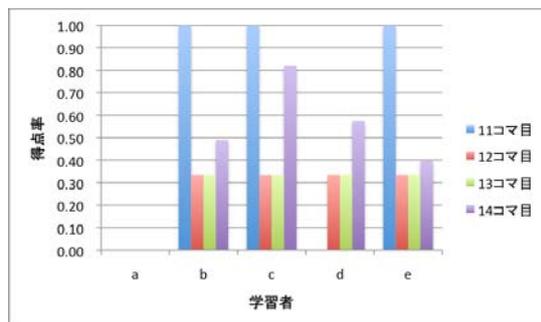


図 13: 応用演習の理解状況

②演習環境

現在までに評価した演習教材のプログラムであれば、2分以内に結果を返すことができる。現在の実装では、学習者が限ループやデッドロックに陥るプログラムを実行した際の回避機構が導入されていない。現在、より実践的な演習ができるような改良を行っているので、演習環境の耐久評価も今後行う予定である。以下、演習環境に関するアンケート結果の抜粋を示す。

- 大体ではあるが計算時間が速くなる様子が理解できた
- コア数が多ければ速いわけではない理由が分かりやすい
- 分割数の概念が難しい
- プロセッサの負担具合はパッと見ではわからない
- 処理性能だけでなく、上手く割り当てをすることの重要性が理解できた
- 実行結果の差が少なかったため、通信速度による違いが分かりにくかった。時間差を顕著に出す方法が難しい
- 意図的に通信速度を変える事で計算時間にも影響する様子が理解できた

(5) まとめ

MPIプログラミングを対象に、疑似的な「可変性」のもとでプログラミング演習を行える環境を構築することができた。これは、並列アーキテクチャの学習・理解を推進するための「リコンフ・プログラミング教育システム」

のベースを構築したことは、「可変性」や「柔軟性」に着目した計算機システムが求められる現状を踏まえると、大きな成果となった。なお、本教育システムは開発途中であるため、基礎的な評価に留まるが、今後の実践的な評価に向けての改良点などを明らかにした。

一方、ネットワーク速度やノードの特徴を学習者が自由に選択できるための「リコンフィギュラブル・ネットワークスイッチ」に関しては、FPGAの内容を入れ替えることでトポロジ変更の検証までの確認となった。しかし、VHDLによるネットワークスイッチの設計とプロトタイプ実装、ネットワークスイッチのパフォーマンス評価を実施することができた。これらの検証結果を踏まえ、リコンフ・プログラミング教育システムに不可欠な「クラスタスイッチ」の研究開発を継続する。具体的な課題としては、機能の変更、トポロジの変更などの実現を想定している。

(6) 今後の展望

現演習システムには、「分かりやすいデバッグの導入」や「監視機能による計算機群の現状把握」が必要と考えている。これについては、関連研究を調査した上で機能の追加を検討したい。また、演習環境における、マルチコア、CELL、GPUといった特徴ある計算機資源を搭載したノードを複数組み合わせる環境については開発途中となっている。よってリコンフ・プログラミング教育システムとしての実践評価は今後行っていく予定である。

最後に、アーキテクチャ教育に特化した実習や演習を手軽に行えるモジュールについては機能の調査や構想に留まった。これについても、実践評価後に研究を推進していきたい。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計8件)

- 1) 山口真之介, 荒牧慎二, 堀内新吾, 大西淑雅, 「小テスト教材の作成と配信への取り組み」, 大学 e-ラーニング協議会フォーラム 2010, pp. 42-45 (2011. 3. 25), 金沢大学
- 2) Ohnishi, Y., Yoshida, T., “Design and Evaluation of a Distributed Shared Memory Network for Application-Specific PC Cluster Systems”, 2011 Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications, pp. 63-70 (2011. 3. 22), Biopolis, Singapore, 査読有
- 3) 山口真之介, 有馬明日菜, 大西淑雅, 西野和典, 小林史典, 「音声認識ソフトウェアを活用した講義アーカイブシステムの検討」, 平成 22 年度情報教育研究集会, CDROM, 4 ページ (2010. 12. 11), 京都府民総合交流プラザ
- 4) 大西淑雅, 戸田哲也, 福田豊, 山口真之

介, 西野和典, 「mPage を用いた小テスト実施のための予備実験」, 情報処理学会研究報告 CLE 研究会 Vol. 2010-CLE-2 No. 8, pp. 1-8 (2010. 9. 2), 徳島大学

5) 渡辺健太, 山口真之介, 大西淑雅, 西野和典, 「MPI を対象とした並列処理プログラミング学習環境の構築」, 教育システム情報学会研究報告 Vol. 24, No. 6, pp. 40-45 (2010. 3. 13), 幾央大学

6) 山口真之介, 堀内新吾, 大西淑雅, 「フリーソフトによる e-ラーニング教材の作成と配布方法の提案」, 平成 21 年度情報教育研究集会講演論文集, pp. 413-416 (2009. 11. 14), 東北大学

7) 渡辺健太, 山口真之介, 大西淑雅, 西野和典, 「MPI 並列処理プログラミング Web 演習環境の評価」, 第 62 回電気関係学会九州支部連合大会, 02-1P-02 (2page) (2009. 9. 28), 九州工業大学

8) 渡辺健太, 山口真之介, 大西淑雅, 西野和典, 「MPI を対象とした並列処理プログラミング学習環境の検討」, 教育システム情報学会研究報告, Vol. 23, No. 6, pp. 100-105 (2009. 3. 14), 長崎大学

8) 大西淑雅, 吉田隆一, 「分散共有メモリの接続を変更可能な PC クラスタ用 SW の提案」, 電子情報通信学会技術研究報告 (RECONF), Vol. 108, No. 220, pp. 27-32 (2008. 9. 25), 岡山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大西 淑雅 (OHNISHI YOSHIMASA)

九州工業大学・情報科学センター・講師

研究者番号: 50213806

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし